

基于 AlCl_3 掺杂全溶液法制备反式钙钛矿太阳能电池

李帆杭^{1)2)#} 李一锋^{1)2)#} 何汝杨¹⁾ 王立坤²⁾
万政慧²⁾ 朱江¹⁾ 于东麒^{1)†} 王辉^{2)‡}

1) (辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029)

2) (中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023)

(2025 年 12 月 9 日收到; 2026 年 1 月 15 日收到修改稿)

全溶液法制备反式钙钛矿太阳能电池是钙钛矿太阳能电池发展的趋势之一, 然而, 溶液法制备的氧化镍致密性差且电导率低成为制约大面积制备和提高效率的瓶颈. 因此, 本文提出了一种基于 AlCl_3 掺杂制备氧化镍及反式钙钛矿太阳能电池的方法. 在氧化镍溶液中掺杂氯化铝, 不仅可以提高氧化镍的致密性, 还可以增大氧化镍的电导率, 并且促进了高质量钙钛矿薄膜的生长, 减少了氧化镍与钙钛矿之间的非辐射复合. 基于 AlCl_3 掺杂全溶液法制备的反式钙钛矿太阳能电池转换效率达 24.76%. 该工作为全溶液法制备大面积高效率反式钙钛矿太阳能电池的效率提供了新思路.

关键词: 反式, 钙钛矿太阳能电池, 氧化镍, 氯化铝

DOI: 10.7498/aps.75.20251692

CSTR: 32037.14.aps.75.20251692

1 引言

反式 (p-i-n 结构) 钙钛矿太阳能电池因具有易于溶液法制备、成本低、效率高、稳定性良好等优点, 已成为研究热点, 受到广泛关注^[1-5]. 空穴传输层的制备是实现高效率、高稳定的太阳能电池中极其重要的步骤. 一方面, 空穴传输层是电池的窗口层, 其透过率和电导率直接影响太阳光的吸收和电荷传输; 另一方面, 钙钛矿层直接在空穴传输层上生长, 空穴传输层的形貌及缺陷直接影响钙钛矿层的质量. 反式钙钛矿太阳能电池的空穴传输层主要有有机材料 PTAA, 无机材料 CuO , CuSCN 和 NiO_x 等^[6-9]. NiO_x 作为一种 p 型透明半导体材料, 具有成本低、稳定性好、透光率高、可溶液法制备等优点被广泛应用^[1,10].

然而, 溶液法制备的 NiO_x 致密性差以及电导率低成为制约反式钙钛矿太阳能电池效率提升的关键因素^[11]. 埋底界面 (空穴传输层与钙钛矿层之间的界面) 修饰策略是制备高性能反式钙钛矿太阳能电池的有效途径之一^[12-17]. 2022 年, Wu 等^[18] 通过在 NiO_x 中掺杂锰 (Mn) 作为空穴传输层, Mn 掺杂的 NiO_x 层更有利于钙钛矿的生长, 使其晶粒更大, 结晶度更高, 获得了 17.35% 的光电转换效率. 2025 年 Rajbhandari 等^[19] 在 NiO_x 中掺杂锂 (Li), 提升了 Ni^{3+} 的比例, 提高了钙钛矿膜的生长质量, 光电转换效率从 12% 提升到 19.3%. 2025 年 Song 等^[20] 在 NiO_x 中掺入铵盐 (NH_4Cl 和 NH_4SCN), 显著提高了 NiO_x 的空穴迁移率和电导率, 获得了 23.27% 的光电转换效率. 然而, 基于上述金属掺杂的反式钙钛矿电池转换效率仍比较低, 还需要进一步开发新型掺杂剂提升反式钙钛矿太阳能电池的转换效率.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: dqyu@lnmu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: hwang1606@dicp.ac.cn

三氯化铝 (AlCl_3) 作为一种界面修饰材料被应用在正式钙钛矿太阳电池, 在电子传输层二氧化锡 (SnO_2) 表面旋涂 AlCl_3 溶液, 可以去除 SnO_2 表面的羟基与钾离子, 有效抑制钙钛矿的去质子化过程; 同时, 该过程会在 SnO_2 /钙钛矿界面形成超薄氧化铝层, 发挥钝化层作用. 这种界面修饰可降低漏电流与载流子复合概率, 减小电子传输的能垒, 最终实现开路电压 (V_{oc}) 与器件整体效率的提升. 基于该策略, 单结正式结构钙钛矿太阳电池的认证效率达到 26.29%^[21].

基于以上研究, 本文提出了一种在氧化镍水溶液中掺杂 AlCl_3 来制备氧化镍空穴传输层的方法. 这种方法不仅改善了氧化镍薄膜的致密性, 并提高了氧化镍薄膜的电导率, 此外, 还促进了高质量钙钛矿薄膜的生长, 使全溶液法制备的反式钙钛矿太阳电池的转换效率得到进一步提升.

2 实验部分

2.1 实验材料与试剂

FTO 玻璃从利博有限公司购置. 氧化镍 (nickel oxide, NiO_x) 从辽宁优选科技有限公司购置. 氯化铝 (AlCl_3) 购自上海麦克林生化科技有限公司. 钙钛矿材料碘化铅 (PbI_2)、碘化铯 (CsI)、碘甲脒 (FAI)、甲胺盐酸盐 (MACl)、2, 9-二甲基-4, 7-联苯-1, 10-菲啉 (2, 9-Dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline, BCP) 均从西安浴日光能股份有限公司购置. 溶解钙钛矿材料所用溶剂 1-甲基-2-吡咯烷酮 (1-Methyl-2-pyrrolidinone, NMP) 和 N, N-二甲基甲酰胺 (DMF) 分别购自西格玛奥德里奇 (上海) 贸易有限公司和上海阿拉丁试剂有限公司. 电子传输层材料 [6,6]-苯基- C_{61} -丁酸甲酯 ([6,6]-phenyl- C_{61} -butyric acid methyl ester, PCBM) 和溶解所用溶剂氯代苯 (CB) 分别从辽宁优选科技有限公司和国药集团化学试剂有限公司购置. 电子传输层材料 2, 9-二甲基-4, 7-联苯-1, 10-菲啉 (2, 9-Dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline, BCP) 从西安浴日光能股份有限公司购置, 溶解 BCP 所用溶剂异丙醇 (IPA) 购于国药集团化学试剂有限公司.

2.2 太阳电池的制备

溶液配制: 称取氧化镍 20 mg, 加入 1000 μL

去离子水中可获得浓度为 20 mg/mL 的氧化镍溶液; 在配制的 1000 μL 氧化镍溶液中加入 0.5 mg 氯化铝, 可获得氯化铝浓度为 0.5 mg/mL 的氧化镍与氯化铝混合溶液. 称取碘化铅 613 mg, 碘甲脒 196 mg, 碘化铯 26 mg, 甲胺盐酸盐 14 mg, 加入 1000 μL N, N-二甲基甲酰胺和 200 μL 1-甲基-2-吡咯烷酮的溶剂中, 可获得化学计量比为 $\text{Cs}_{0.08}\text{FA}_{0.92}\text{PbI}_3$ 的钙钛矿前驱体溶液, 溶液浓度为 1.03 mol/L, 并将其置于磁力搅拌台上搅拌 3 h 以上. 称取 PCBM 20 mg, 溶于 1000 μL CB 中可获得浓度为 20 mg/mL 的 PCBM 溶液. 将过量的 BCP 溶于 IPA 中, 过滤后获得 BCP 的饱和异丙醇溶液.

基底清洗与处理: 将 FTO 玻璃依次浸润在去离子水和乙醇中, 并分别进行超声波清洗 45 min, 清洗后浸泡在乙醇中备用. 旋涂空穴传输层前, 取出浸泡在乙醇中的玻璃并用氮气吹干, 随后置于 UV 臭氧设备中处理 15 min.

空穴传输层的制备: 用移液枪吸取 200 μL 氧化镍溶液或氧化镍与氯化铝混合溶液, 以 1500 rad/min 的速度、1500 rpm/s 的加速度在玻璃/FTO 衬底上旋涂 30 s, 旋涂结束后, 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 的热台上退火 10 min. 随后采用氩气等离子体 (plasma) 设备对玻璃/FTO/ NiO_x 衬底进行表面处理, 氩气流量为 23 sccm, 处理时间为 2.5 min.

钙钛矿层的制备: 用移液枪吸取 19 μL 钙钛矿前驱体溶液, 缓慢滴加在玻璃/FTO/ NiO_x 基底与刮刀形成的缝隙前端, 确保溶液均匀分布在缝隙中, 避免产生气泡, 然后以 3 mm/s 的速度匀速推动刮刀, 使钙钛矿前驱体溶液在基底上均匀铺展, 随后将涂覆钙钛矿前驱体湿膜基底置于闪蒸仪器中闪蒸 45 s, 然后将其在 110 $^{\circ}\text{C}$ 热台上退火 20 min, 自然冷却至室温.

电子传输层制备: 在钙钛矿层表面以 3000 rad/min 的速度、3000 rpm/s 的加速度旋涂配制的 PCBM 氯苯溶液, 旋涂时长为 30 s. 再以 5000 rad/min 的速度、3500 rpm/s 的加速度旋涂 BCP 的饱和异丙醇溶液, 旋涂时长为 40 s.

电极制备: 在电子传输层表面蒸镀 150 nm 的银电极, 电极面积为 0.09 cm^2 .

2.3 测试与表征

在薄膜光电特性表征方面, 氧化镍溶液的动态光散射使用纳米激光粒度仪 (dynamic light

scattering, DLS, Zetasizer Nano) 进行测试; 氧化镍及钙钛矿薄膜表面形貌使用场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FESEM, 日立 SU8020) 进行表征; 氧化镍及钙钛矿薄膜表面粗糙度使用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM, BRUKER, Nanowizard 4XP) 进行表征; 氧化镍的镍和氧元素能谱使用 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectrometer, XPS, Thermo ESCALAB 250Xi) 进行测试; 氧化镍和钙钛矿能级使用紫外光电子能谱 (ultraviolet photo-electron spectroscopy, UPS, Thermo ESCALAB 250Xi) 进行测试; 钙钛矿薄膜的晶体结构采用 X 射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD, Cu $K\alpha_1$ SmartLab ($\lambda = 1.541 \text{ \AA}$)) 进行表征分析; 钙钛矿薄膜的稳态光致发光光谱 (steady-state photoluminescence, PL) 和时间分辨光致发光光谱 (time-resolved photoluminescence, TRPL) 使用爱丁堡仪器有限公司 (Edinburgh Instruments) 的 FLS920 谱仪于室温条件下进行表征; 氧化镍薄膜的电导率采用 Keithley 2450 数字源表测试, 扫描范围为 $-3 \sim 3 \text{ V}$, 扫描步长为 0.1 V ; 氧化镍薄膜的透光率采用紫外可见近红外分光光度计 (ultraviolet-visible-near-infrared spectrophotometer, UV, 3600IPLUS) 进行测试; 钙钛矿薄膜的空间电荷限制电流 (space charge limited current, SCLC) 在暗态下使用 Keithley 2450 数字源表测试, 扫描范围设置为 $0 \sim 3 \text{ V}$; 在电池光电特性表征方面, 钙钛矿太阳能电池的莫特肖特基 (Mott-Schottky) 曲线使用 Zahner Zennium IM6e 电化学工作站进行测试; 电池在标准光强和变化光强下的 $J-V$ 曲线采用 Keysight B2902A 进行测试, 正向扫描范围为从 $-0.1 \sim 1.4 \text{ V}$, 反向扫描范围为 $1.4 \sim -0.1 \text{ V}$, 扫描步长为 0.02 V ; 电池的外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 采用太阳能电池量子效率检测仪进行测试.

3 结果与讨论

3.1 AlCl_3 掺杂对 NiO_x 性能的影响

具有良好分散性的氧化镍前驱体溶液是制备空穴传输层的基础. 因此, 本文研究了 AlCl_3 掺杂对氧化镍前驱体溶液分散性的影响. 掺杂前后氧化

镍溶液的动态光散射 (DLS) 和 Zeta 电位测试结果如图 1 所示.

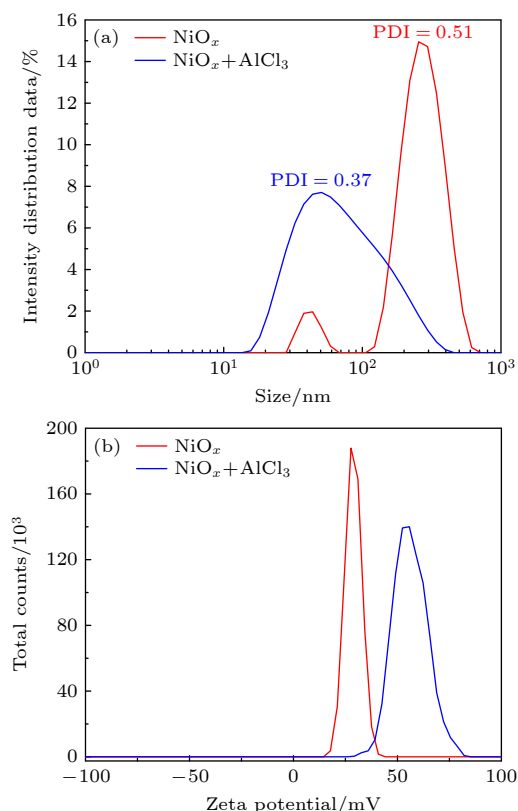


图 1 NiO_x 溶液和 $\text{NiO}_x+\text{AlCl}_3$ 溶液 (蓝线) (a) 动态光散射图; (b) Zeta 电位图

Fig. 1. Nickel oxide aqueous solution (red line) and Aluminum chloride doped nickel oxide aqueous solution (blue line): (a) DLS plot; (b) Zeta potential distribution.

从图 1(a) 可以看出, AlCl_3 掺杂后的氧化镍溶液中颗粒平均粒径变小, 由 260.5 nm 降低到了 64.02 nm , 并且粒径多分散指数 (PDI) 由 0.51 降至 0.37 , 说明粒径尺寸分布更加集中. 从图 1(b) 可以看出, AlCl_3 掺杂后 NiO_x 溶液的 Zeta 电位从 28.8 mV 提升至 45.8 mV . Zeta 电位的绝对值在 $20 \sim 30 \text{ mV}$ 之间, 表明溶液体系处于临界稳定状态; Zeta 电位的绝对值高于 30 mV 时, 颗粒间静电斥力较强, 体系稳定性好, 不易发生团聚. 经过 AlCl_3 掺杂后, Zeta 电位上升, 表明颗粒间的静电排斥力使得溶液的分散性更好, 有效防止了颗粒团聚. 以上测试结果表明 AlCl_3 掺杂使得氧化镍溶液分散性更好, 体系中颗粒更独立, 团聚程度降低, 这有利于形成更均匀、致密的氧化镍薄膜.

图 2(a), (b) 是在 FTO 玻璃上制备的氧化镍薄膜的表面形貌测试图. 从图 2(a) 可以看出, 由于未掺杂的氧化镍溶液分散性不好, 制备的氧化镍薄

膜发生了聚集, 没有完全覆盖住 FTO 层. 采用 AlCl_3 掺杂的氧化镍溶液制备的氧化镍薄膜更加致密, FTO 层完全被覆盖, 如图 2(b) 所示. 此外, 采用 AlCl_3 掺杂溶液制备的 NiO_x 层表面粗糙度由 30.5 nm 降低至 28.4 nm, 如图 2(c), (d) 所示, 这会使氧化镍与钙钛矿层的结合更加紧密, 电池的稳定性会更好. 氧化镍致密性变好的原因是 Al^{3+} 在晶界处偏聚或形成非晶相, 抑制了 NiO 在退火过程中的晶粒粗化, 形成更细小、更均匀的晶粒堆积. 并且, AlO_x 可能在退火中起到“矿化剂”或“黏合剂”的作用, 填充 NiO 颗粒间的孔隙, 形成更致密、更连续的薄膜. 图 2(e), (f) 是有无 AlCl_3 掺杂的氧化镍层表面水接触角测试图. 可以看出, 有 AlCl_3 掺杂的氧化镍层表面水接触角由 21.4° 减小至 8.9° . 氧化镍的水接触角变小, 说明其表面从相对疏水性向亲水性转变, 转变的原因是氧化镍表面官能团的变化. AlCl_3 水解引入的 $\text{Al}-\text{OH}$ 基团比 $\text{Ni}-\text{OH}$ 具有更强的亲水性. Al^{3+} 倾向于形成更多的表面羟

基, 提高了薄膜的表面能. 亲水且平滑的 NiO 表面会使钙钛矿前驱体溶液均匀铺展, 避免了由于局部浸润性差导致的未成膜或膜厚不均.

氧化镍高的电导率有助于空穴的传输, 从而提升太阳电池的转换效率. 因此, 进一步考察 AlCl_3 掺杂对氧化镍电导率的影响. 图 3 是有无 AlCl_3 掺杂氧化镍样品的 $I-V$ 测试图. 样品的结构为玻璃/ FTO/NiO_x (有无 AlCl_3 掺杂)/Ag, 氧化镍薄膜的电导率表达式为

$$\sigma = IL/(VS) \quad (1)$$

其中, L 为氧化镍薄膜厚度, S 为氧化镍薄膜面积, V 为测试电压, I 为测试电流. 测试样品氧化镍薄膜厚度 L 为 30 nm, 面积 S 为 0.09 cm^2 , 由图 3 和 (1) 式计算可得, AlCl_3 掺杂后氧化镍薄膜的电导率从 $7.13 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ 提升至 $1.11 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$, 这说明 AlCl_3 掺杂改善了氧化镍层的导电性能, 有利于空穴的传输.

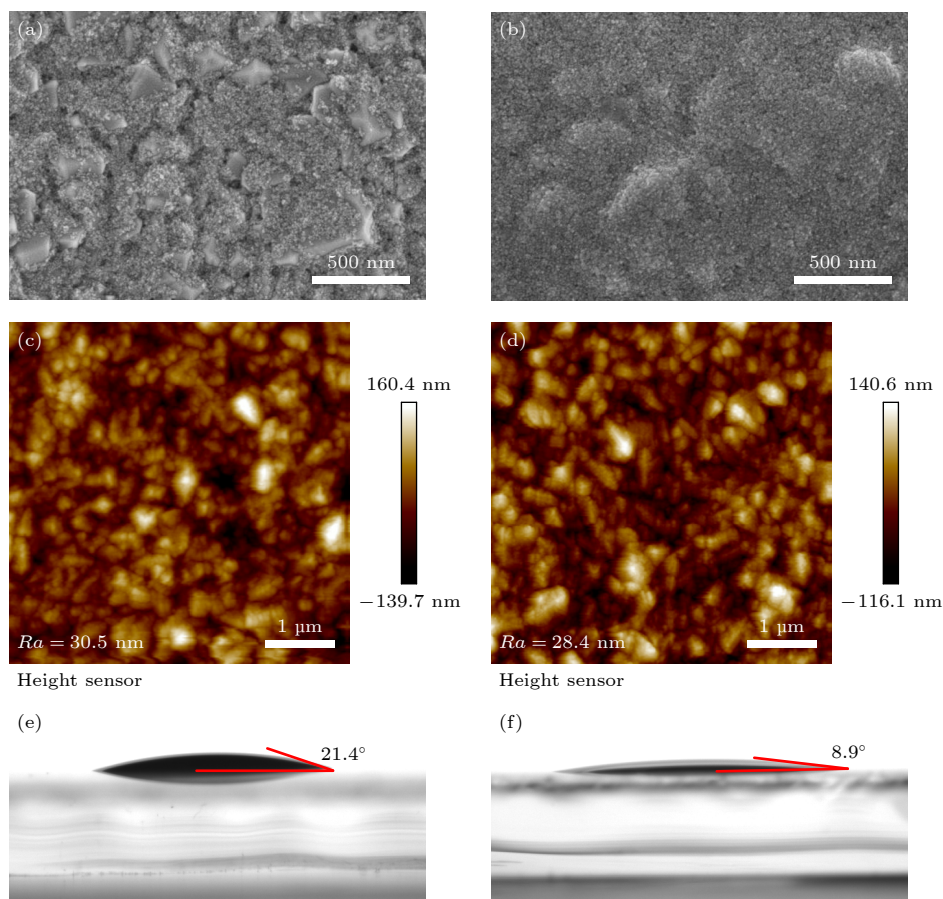


图 2 (a) 未经掺杂的 NiO_x 薄膜和 (b) AlCl_3 掺杂的 NiO_x 薄膜的 SEM 照片; (c) 未经掺杂的 NiO_x 薄膜和 (d) AlCl_3 掺杂的 NiO_x 薄膜的 AFM 照片; (e) 未经掺杂的 NiO_x 薄膜和 (f) AlCl_3 掺杂的 NiO_x 薄膜的水接触角图

Fig. 2. SEM images of (a) without and (b) with AlCl_3 doped nickel oxide film; AFM images of (c) without and (d) with AlCl_3 doped nickel oxide film; water contact angle images of (e) without and (f) with AlCl_3 doped nickel oxide film.

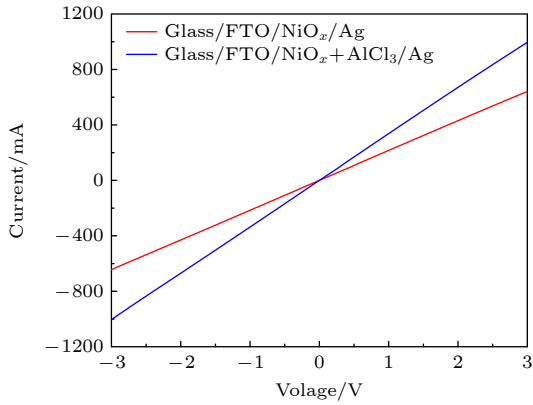


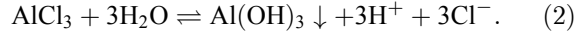
图 3 未经掺杂(红线)和经 AlCl_3 掺杂(蓝线) NiO_x 的 $I-V$ 图谱

Fig. 3. $I-V$ curves of undoped nickel oxide film (red line) and AlCl_3 doped nickel oxide film (blue line).

为探究氧化镍电导率升高的原因,对有无 AlCl_3 掺杂的氧化镍薄膜进行 XPS 测试,结果如图 4 所示.

图 4(a), (b) 分别是没有 AlCl_3 掺杂和有 AlCl_3 掺杂氧化镍样品中 Ni 2p 的拟合图谱,图谱中的 853.7 eV 和 855.7 eV 两个峰分别对应着 Ni^{2+} (NiO) 和 Ni^{3+} (Ni_2O_3),从图中可以看出, AlCl_3 掺杂的氧化镍中的 Ni^{3+} 所占比例从 16% 上升至 40%, Ni^{2+}

离子比例的增大一方面提升了 NiO_x 的电导率,提高了空穴提取能力;另一方面会增大 NiO_x 的功函,从而优化与钙钛矿吸光层的能级匹配,减少空穴提取的势垒. Ni^{3+} 比例增大的主要原因是 AlCl_3 水解产生的酸性环境,与镍前驱体形成混合羟基凝胶,在低温退火过程中, Al^{3+} 催化并稳定了由脱质子过程所诱导的 Ni^{2+} 向 Ni^{3+} 的氧化. 具体过程如下:首先, AlCl_3 在氧化镍溶液中发生了水解反应,反应方程式为



由 (2) 式可知,溶液呈酸性,在酸性水溶液中, Ni^{2+} 的稳定性很高.但在后续的旋涂成膜和退火过程中,随着水分蒸发和加热,发生了脱质子与氧化还原耦合反应.在 120°C 退火时,前驱体中的结合水、羟基 ($-\text{OH}$) 发生脱除,并伴随着质子 (H^+) 的迁移和电子的转移,即两个相邻的 $\text{Ni}^{2+}-\text{OH}$ 单元,在脱水时会发生“质子-电子共转移”,生成一个 $\text{Ni}^{3+}-\text{O}$ 单元和一个 Ni^{2+} ,并释放出氢气或水.反应方程式为

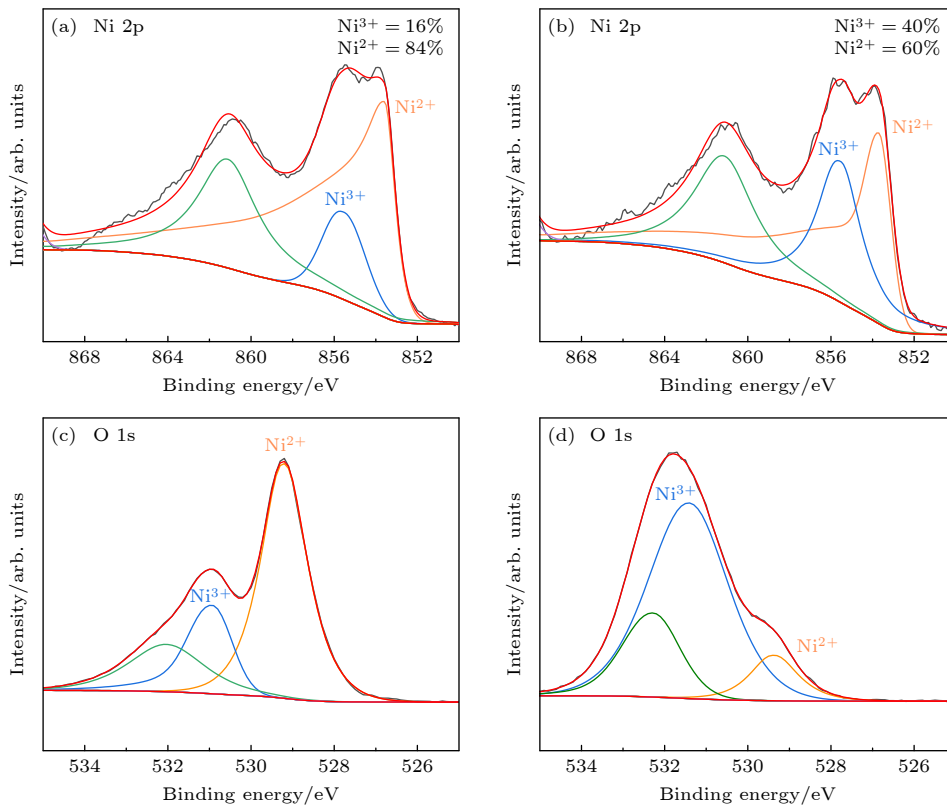
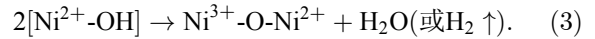


图 4 (a) 未掺杂氧化镍和 (b) AlCl_3 掺杂氧化镍的 Ni 2p 的 XPS 图谱; (c) 未掺杂氧化镍和 (d) AlCl_3 掺杂氧化镍的 O 1s 的 XPS 图谱

Fig. 4. Ni 2p XPS spectra of (a) without and (b) with AlCl_3 doped nickel oxide film; O 1s XPS spectra of (c) without and (d) with AlCl_3 doped nickel oxide film.

图 4(c), (d) 分别是没有 AlCl_3 掺杂和有 AlCl_3 掺杂氧化镍样品中 O 1s 的拟合图谱, 图谱中的 529.1 eV 和 530.8 eV 两个峰分别对应着 $\text{Ni}^{2+}(\text{NiO})$ 和 $\text{Ni}^{3+}(\text{Ni}_2\text{O}_3)$, O 1s 的 XPS 图谱测试结果也充分证明了 AlCl_3 掺杂会促进 Ni^{3+} 离子比例增大.

氧化镍高的透光率可以保证太阳能电池具有足够的光吸收, 产生较大的电流密度. 因此研究了 AlCl_3 掺杂对氧化镍层透光率的影响. 图 5 为 FTO 玻璃以及有无 AlCl_3 掺杂氧化镍薄膜的透光率测试图谱.

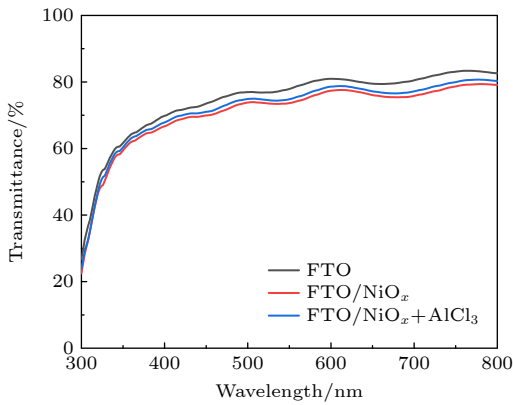


图 5 玻璃/FTO(黑线)、未经修饰的 NiO_x 薄膜(红线)和经 AlCl_3 掺杂的 NiO_x 薄膜(蓝线)的透过率光谱
Fig. 5. Transmission spectra of 玻璃/FTO (black line) and undoped nickel oxide film (red line) and AlCl_3 doped nickel oxide film (blue line).

由图 5 可以看出, 相比未掺杂的 NiO_x , AlCl_3 掺杂后 NiO_x 的透光率增大. 这主要是由于 AlCl_3 掺杂后制备的氧化镍薄膜更均匀, 表面粗糙度更低, 如图 2 所示. 表面粗糙度的降低会减少光散射, 从而提高透光率.

综上所述, AlCl_3 掺杂不仅使氧化镍前驱体溶

液分散性更好, 颗粒粒径更小, 从而使生长的氧化镍薄膜致密性变好, 粗糙度变低, 提高了氧化镍的透光率; 还提高了氧化镍中 Ni^{3+} 离子比例, 进而提升了氧化镍的电导率, 为制备高质量钙钛矿薄膜及电池奠定了基础.

3.2 AlCl_3 掺杂对钙钛矿薄膜性能的影响

大尺寸晶粒是高质量钙钛矿薄膜的重要特征之一. 我们研究了氧化镍中 AlCl_3 掺杂对钙钛矿薄膜形貌和尺寸的影响. 为方便表述, 下文中氧化镍中没有 AlCl_3 掺杂的样品记为对照组, 氧化镍中有 AlCl_3 掺杂的样品记为掺杂组. 钙钛矿层的扫描电子显微镜 (SEM) 测试结果如图 6 所示.

通过图 6(a), (b) 可以看出, 对照组的钙钛矿晶粒较小, 且晶粒间间隙较大, 存在较多孔洞, 掺杂组的钙钛矿层晶粒显著增大, 间隙和孔洞都有所减少. 从图 6(c) 钙钛矿晶粒尺寸分布图可以看出: 对照组的钙钛矿晶粒较小, 大部分颗粒直径在 300 nm 左右, 掺杂组的钙钛矿晶粒直径显著增大, 大多在 500—700 nm, 最大可达到 1100 nm. 钙钛矿的成膜包含两个过程: 成核和生长. 对照组氧化镍粗糙表面会导致异相成核位点过多且分布随机, 引发大量晶核同时形成, 最终晶粒小、晶界多. 而掺杂组平整且化学均匀的表面提供了能量均匀的成核位点, 减少了过量的异相成核中心, 使得成核密度得到控制. 并且, 掺杂组平滑表面减少了钙钛矿分子/离子在生长过程中的扩散障碍, 有利于已形成的晶核通过奥斯瓦尔德熟化或晶界迁移相互融合, 长大成为大晶粒.

另外, 还对钙钛矿层进行了表面粗糙度和水接触角测试, 如图 7 所示. 从图 7(a), (b) 可以看出,

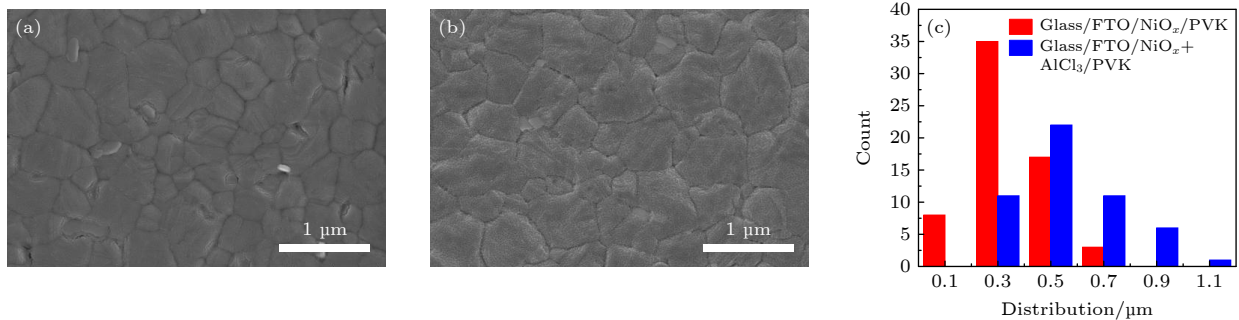


图 6 (a) 无和 (b) 有 AlCl_3 掺杂氧化镍上的钙钛矿薄膜的 SEM 图; (c) 晶粒尺寸统计分布图

Fig. 6. SEM images of perovskite film (a) without and (b) with AlCl_3 doped nickel oxide film; (c) histogram of perovskite grain size distribution from image analysis.

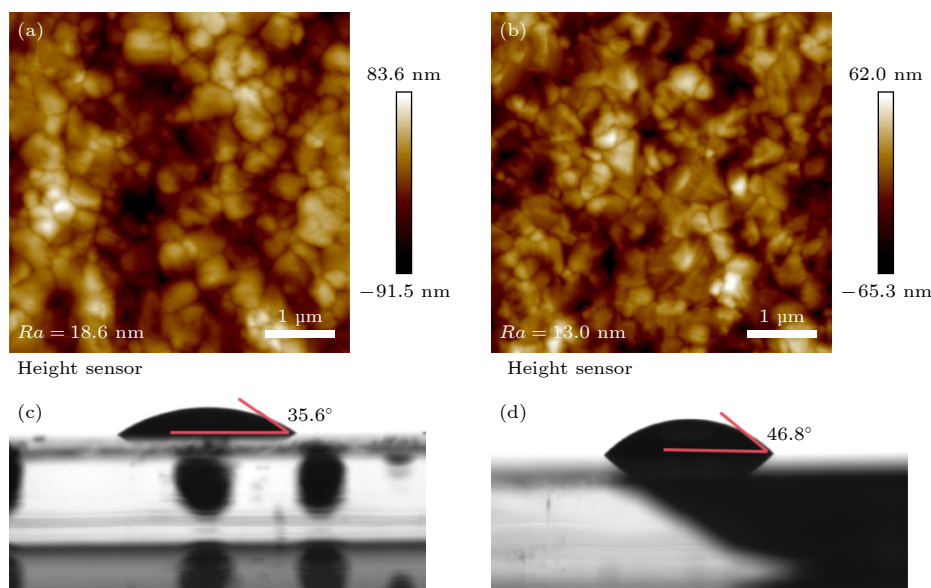


图 7 (a) 无和 (b) 有 AlCl_3 掺杂氧化镍上的钙钛矿薄膜的 AFM 图; (c) 无和 (d) 有 AlCl_3 掺杂氧化镍上的钙钛矿薄膜的水接触角图
 Fig. 7. AFM images of perovskite film (a) without and (b) with AlCl_3 doped nickel oxide film; water contact angle images of perovskite film (c) without and (d) with AlCl_3 doped nickel oxide film.

掺杂组钙钛矿薄膜表面粗糙度由 18.6 nm 降至 13.0 nm, 粗糙度降低是由于氧化镍基底的良好诱导作用使钙钛矿晶粒具有更强的择优取向. 取向一致的晶粒在合并时界面匹配度好, 不易产生高度差, 表面因而更光滑. 此外, 从图 7(c), (d) 可以看出, 掺杂组钙钛矿薄膜的水接触角由 35.6° 增大到 46.8° . 钙钛矿薄膜的水接触角增大 (疏水性增强) 与钙钛矿薄膜表面的缺陷有关. 高质量的钙钛矿晶体具有完整的有机阳离子覆盖表面. 这些有机基团向外排列, 形成了天然的疏水层. AlCl_3 掺杂的氧化镍促进了钙钛矿的大晶粒、全覆盖生长, 减少了由于晶界、针孔或非晶区域暴露出的无机骨架 (Pb-I), 后者是亲水性的. 钙钛矿薄膜疏水性增强, 会延缓由水汽引发的钙钛矿分解, 从而增强材料的环境稳定性.

我们进一步利用 X 射线衍射谱 (XRD) 来分析钙钛矿的结晶情况. 如图 8 所示. 掺杂组钙钛矿薄膜在 (001) 晶面衍射峰强度更大, 说明钙钛矿薄膜在 (001) 晶面上择优生长. 如前文所述, 平滑的基底使钙钛矿前驱体溶液铺展均匀, 溶剂蒸发和成核过程同步性高. 在这种受控的结晶环境中, (001) 晶面上最先形成的晶核具有生长优势, 它们能更快地横向合并, 抑制其他随机取向晶核的生长. 钙钛矿薄膜的 (001) 晶面是载流子迁移率最高的方向之一. 钙钛矿薄膜在 (001) 晶面上的增强,

意味着光生载流子可以沿着最优的传输通道, 垂直穿过薄膜 (从顶电极到底电极), 从而提升载流子收集效率. 此外, 掺杂组钙钛矿薄膜 (001) 晶面的半峰宽 (FWHM) 由 0.13° 减小到 0.10° , 说明在掺杂 AlCl_3 基底上生长的钙钛矿薄膜结晶质量得到改善, 晶粒尺寸增大、晶体结构更加完整、缺陷减少, 这也与图 6 得到的结果相一致.

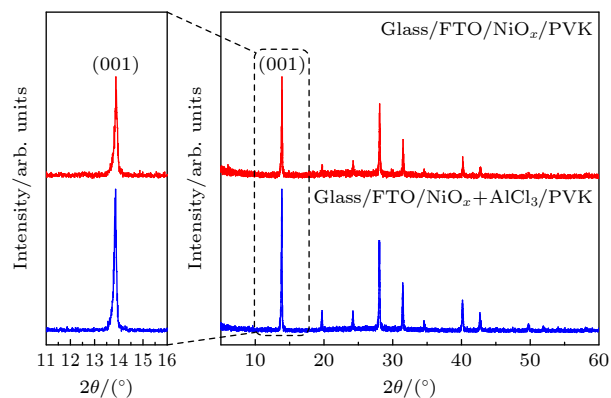


图 8 未经掺杂氧化镍上的钙钛矿薄膜 (红线) 和经 AlCl_3 掺杂氧化镍上的钙钛矿薄膜 (蓝线) 的 XRD 图和 (001) 晶相放大图
 Fig. 8. XRD spectra of perovskite film on undoped nickel oxide film (red line) and perovskite film on AlCl_3 doped nickel oxide film (blue line) and enlarged view of the crystalline phase.

之后对钙钛矿层进行 PL 和 TRPL 谱的测试, 如图 9 所示. PL (光致发光) 来源于钙钛矿中光生

之后对钙钛矿层进行 PL 和 TRPL 谱的测试, 如图 9 所示. PL (光致发光) 来源于钙钛矿中光生

电子和空穴的辐射复合, TRPL(时间分辨光致发光) 直接测量激发后 PL 强度随时间衰减的速度, 反映的是光生载流子衰减的速率. 掺杂组钙钛矿薄膜的 PL 峰强度减弱和 TRPL 峰衰减速度变快, 说明光生电子和空穴的复合减少, 载流子被快速提取出来 [22]. 进一步, 对 TRPL 曲线采用双指数衰减函数进行拟合, 可以计算光生载流子寿命 [23,24], 如 (4) 式和 (5) 式所示:

$$f(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + B, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{ave}} = \frac{A_1\tau_1^2 + A_2\tau_2^2}{A_1\tau_1 + A_2\tau_2}, \quad (5)$$

其中 τ_1 是快速衰减分量的时间常数, τ_2 是慢衰减分量的时间常数, A_1 和 A_2 为衰减幅度. 经计算掺杂组钙钛矿薄膜光生载流子寿命由 1398.34 ns 降至 1235.37 ns, 具体参数如表 1 所示. 光生载流子寿命的减小说明 AlCl_3 掺杂提升了 NiO_x 作为空穴传输层的性能, 导致光生载流子 (特别是空穴) 被从钙钛矿层中快速、高效率地提取和转移.

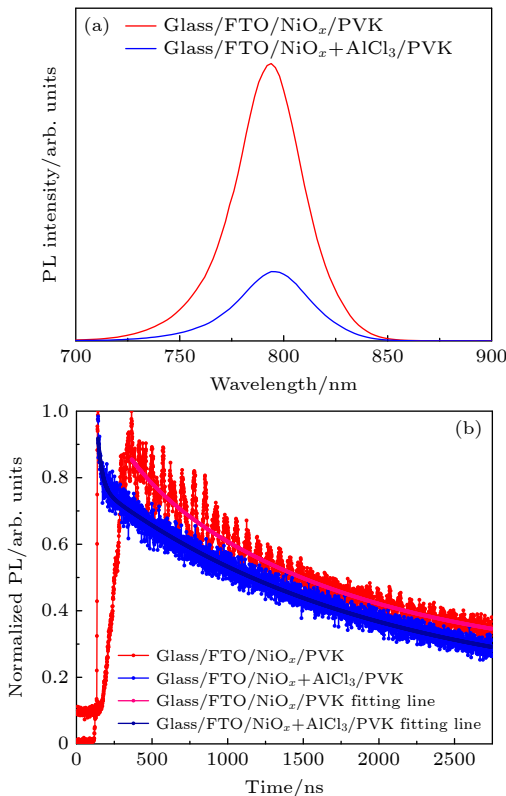


图 9 基底未经掺杂 (红线) 和经 AlCl_3 掺杂 (蓝线) 的钙钛矿薄膜: (a) PL 图谱; (b) TRPL 图谱

Fig. 9. Perovskite films on undoped substrate (red line) and AlCl_3 doped substrate (blue line): (a) PL spectra; (b) TRPL spectra.

表 1 基底未经掺杂的钙钛矿薄膜, 经 AlCl_3 掺杂的钙钛矿薄膜的 TRPL 光谱拟合参数

Table 1. Perovskite film on undoped substrate and AlCl_3 doped substrate of TRPL spectral fitting parameters.

	τ_1/ns	A_1	τ_2/ns	A_2	$T_{\text{average}}/\text{ns}$
玻璃/FTO/ NiO_x /PVK	215.90	0.25	1458.30	0.73	1398.34
玻璃/FTO/ $\text{NiO}_x+\text{AlCl}_3$ /PVK	29.13	20.14	1810.26	0.68	1235.37

为进一步评估钙钛矿薄膜的缺陷态密度, 对纯空穴器件进行 SCLC 测试, 器件结构为玻璃/FTO/ NiO_x (有无 AlCl_3 掺杂)/PVK/spiro/Ag, 测试结果如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 掺杂组钙钛矿薄膜的陷阱填充极限电压 (V_{TFL}) 由 0.36 V 降到 0.22 V, 说明掺杂组钙钛矿薄膜的缺陷态密度下降, 再进一步, 根据缺陷态密度 N_t [25] 公式进行计算, 如 (6) 式所示:

$$N_t = 2\epsilon\epsilon_0 V_{\text{TFL}} / (eL^2), \quad (6)$$

其中 L 为钙钛矿薄膜介质的厚度, 样品的 L 约为 500 nm, e 为基本电荷 (1.602×10^{-19} C), ϵ 为相对介电常数 46.9, ϵ_0 为真空介电常数 (8.8542×10^{-14} F/cm). 计算得到对照组与掺杂组的 N_t 分别为 $7.47 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $4.56 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 缺陷态密度 (N_t) 的降低说明 AlCl_3 掺杂 NiO_x 诱导生长的钙钛矿薄膜体相缺陷更少, 同时也说明图 9 中掺杂组 PL 峰强度减小和 TRPL 峰衰减加快归因于空穴地高效提取, 而非钙钛矿中缺陷复合.

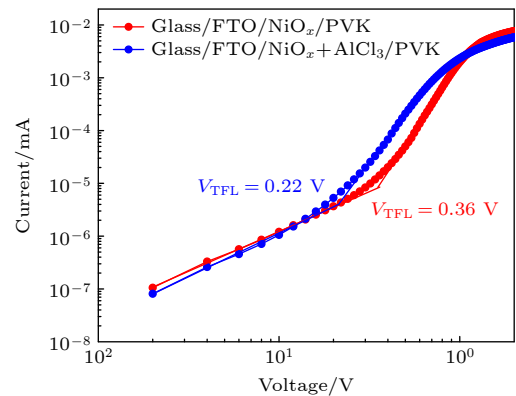


图 10 氧化镍未经掺杂 (红线) 和经 AlCl_3 掺杂 (蓝线) 的空穴传输层器件的电流-电压曲线

Fig. 10. Current-voltage curves of hole-only devices based on undoped nickel oxide film (red line) and AlCl_3 doped (blue line) nickel oxide film.

综上所述, 在 AlCl_3 掺杂 NiO_x 基底上生长的钙钛矿薄膜晶粒尺寸更大, 缺陷态密度更小, NiO_x

与钙钛矿之间空穴提取速度更快, 这些有利于提升钙钛矿太阳电池光电性能.

3.3 AlCl₃ 掺杂对钙钛矿太阳电池性能的影响

采用全溶液法制备了反式钙钛矿太阳电池, 电池结构为玻璃/FTO/NiO_x(NiO_x+AlCl₃)/PVK/PCBM/BCP/Ag, 考察 AlCl₃ 掺杂对钙钛矿太阳电池性能的影响. 电池的性能参数如图 11 所示. 通过图 11(a)–(d) 可以看出, 相比于对照组, 掺杂组电池的开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率均有所提升.

对照组和掺杂组中转换效率最高的电池的性能参数如表 2 所示, *J-V* 曲线如图 12 所示, 其中实

线是电池反扫获得的 *J-V* 曲线, 虚线是正扫获得的 *J-V* 曲线, 可以看出, 正反扫曲线不重合, 这一现象称为迟滞效应. 这是由于离子迁移、界面缺陷等多种因素引起的, 由于传输层与钙钛矿的能级不匹配、界面缺陷多或传输能力不对称, 导致一种载流子被高效提取, 而另一种被阻塞, 在界面处形成空间电荷, 并形成一个与扫描方向和速率相关的内部电场, 从而调制有效电场, 影响电流输出.

电池的迟滞程度通常通过迟滞因子 (hysteresis index, *H*) 这一指标进行评估, 迟滞因子的计算方法^[26]如下:

$$H = (P_r - P_f)/P_r, \quad (7)$$

其中, *P_r* 为反向扫描的电池效率, *P_f* 为正向扫描的电池效率. 经计算, 掺杂组钙钛矿太阳电池迟滞因

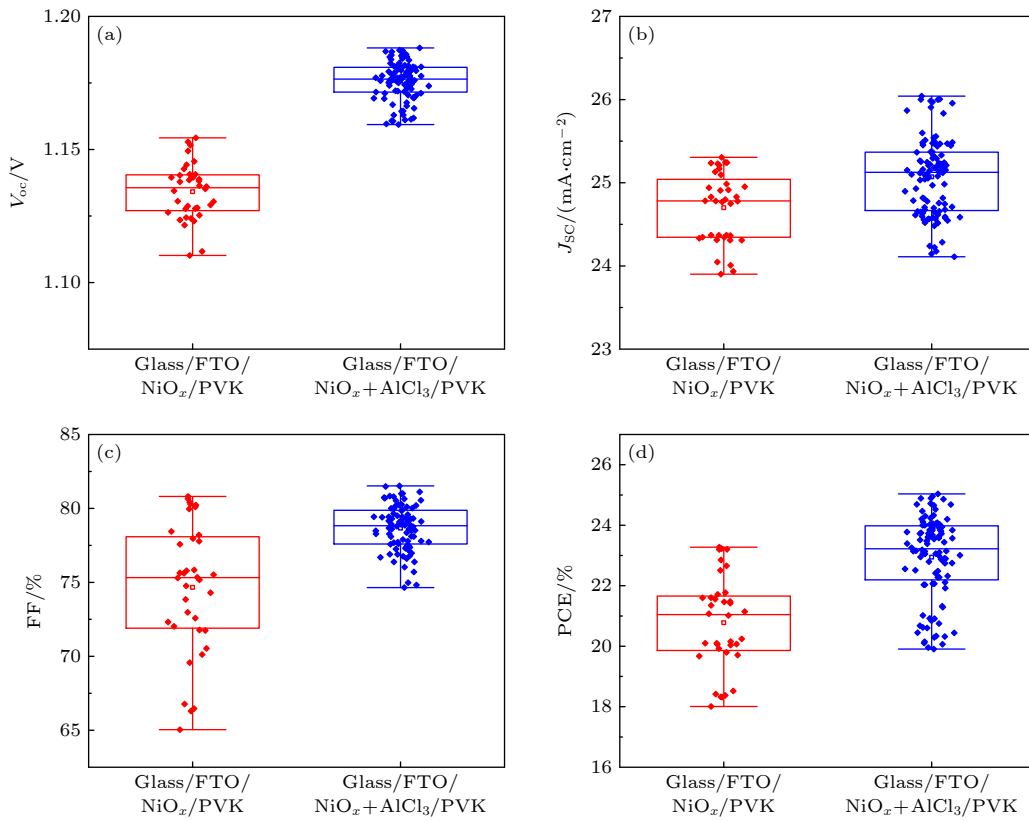


图 11 钙钛矿太阳电池的 (a) *V_{oc}* 箱线图, (b) *J_{sc}* 箱线图, (c) FF 箱线图, (d) PCE 箱线图

Fig. 11. (a) Box plot of *V_{oc}*, (b) box plot of *J_{sc}*, (c) box plot of FF, (d) box plot of PCE of perovskite solar cells.

表 2 钙钛矿电池正反扫的光伏参数

Table 2. *J-V* photovoltaic parameters of perovskite solar cells.

Devices		<i>V_{oc}</i> /V	<i>J_{sc}</i> /(mA·cm ⁻²)	FF/%	PCE/%
玻璃/FTO/NiO _x /PVK/pcbm/Ag	Forward	1.14	25.22	75.80	21.80
	Reverse	1.15	25.16	80.81	23.38
玻璃/FTO/NiO _x +AlCl ₃ /PVK/pcbm/Ag	Forward	1.18	25.98	78.36	24.02
	Reverse	1.18	25.99	80.74	24.76

子 (H) 由 6.7% 减小为 3.1%, H 值减小归因于钙钛矿/ NiO_x 界面较小的能量壁垒, 光生空穴能被 NiO_x 层快速提取, 避免了空穴在钙钛矿/ NiO_x 界面处的堆积.

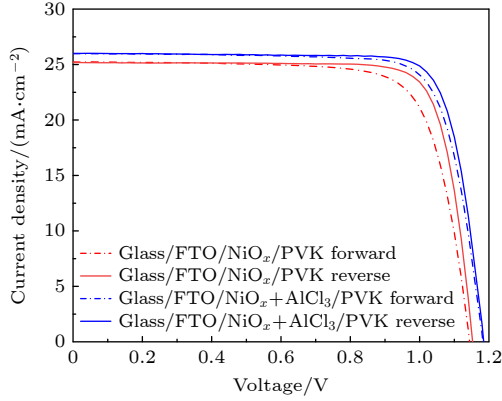


图 12 基底未经掺杂和经 AlCl_3 掺杂的钙钛矿电池的 $J-V$ 曲线

Fig. 12. $J-V$ curves for undoped substrate and AlCl_3 doped substrate of perovskite solar cells.

为了计算空穴在钙钛矿/ NiO_x 界面处传输时的能量壁垒, 对氧化镍以及钙钛矿薄膜进行紫外光电子发射光谱 (UPS) 测试, 如图 13 所示. 氧化镍及钙钛矿的费米能级 (E_F) 可依据 (8) 式进行计算:

$$E_F = 21.22 \text{ eV} - E_{\text{cut}}, \quad (8)$$

其中, E_{cut} 是二次电子截止边的结合能, 即图 13(a), (b) 中左图的截距, 21.22 eV 是 He I 的发射能量. 再依据测得的价带顶与费米能级的距离, 即图 13(a), (b) 中右图的截距, 可计算出价带最大值 (E_{VBM}). 依据 UV-Vis 光谱计算出的截距可确定氧化镍及钙钛矿的光学带隙 (E_g), 再依据 (9) 式可计算出导带最小值 (E_{CBM}):

$$E_g = E_{\text{CBM}} - E_{\text{VBM}}. \quad (9)$$

依据上述测试和计算, 绘制的氧化镍及钙钛矿能级结构如图 14 所示. 从图 14 可以看出, 相比于对照组, 掺杂组的 E_{VBM} (-5.71 eV) 与钙钛矿薄膜 E_{VBM} (-5.77 eV) 的差值, 由 0.35 eV 降至 0.06 eV, 能量壁垒的减小有利于减小空穴在界面传输时的能量损失, 从而提高电池转换效率.

为了研究 AlCl_3 掺杂对钙钛矿太阳能电池开路电压、短路电流密度和填充因子的影响, 对电池进行电容-电压、暗态 $I-V$ 和开路电压随光强变化测试, 测试结果如图 15 所示. 图 15(a) 是电池的莫

特-肖特基曲线, 可以获得电池的内建电势 (V_{bi}), 内建电势可由莫特-肖特基方程计算可得 [27], 如 (10) 式所示:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 N_D} \left(V_{\text{bi}} - V - \frac{kT}{e} \right), \quad (10)$$

其中, C 表示电容, N_D 为施主密度, V_{bi} 为内建电

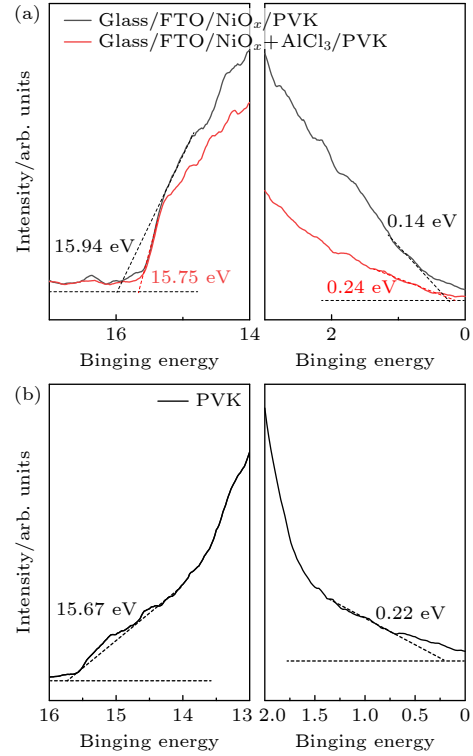


图 13 (a) 未经掺杂 (黑色线) 和经 AlCl_3 掺杂 (红色线) 的氧化镍 UPS 谱图; (b) 钙钛矿层的 UPS 谱图

Fig. 13. (a) UPS spectra of nickel oxide film without doping (black line) and with AlCl_3 doping (red line); (b) UPS spectra of perovskite film.

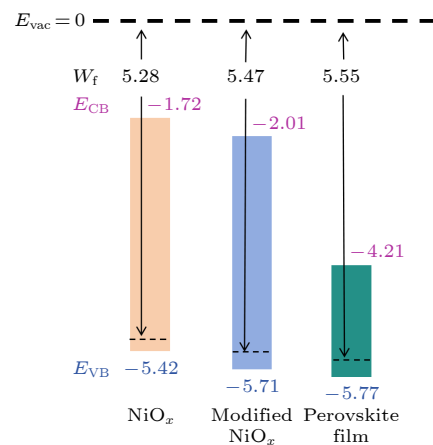


图 14 NiO_x 薄膜及钙钛矿薄膜的能级图

Fig. 14. Energy band structure of NiO_x film and perovskite film.

势, V 是外加电压, k 是玻尔兹曼常数, e 为元电荷, T 为绝对温度. 经计算, 掺杂组电池的内建电势 (V_{bi}) 由 1.06 V 提升至 1.08 V, 更高的内建电势加强了钙钛矿层内的电场, 促进光生电子-空穴对的分离, 减少复合. 此外, 更强的内建电场会抑制载流子反向扩散, 减小暗态反向饱和电流^[28]. 对照组和掺杂组电池的暗态 $I-V$ 测试结果如图 15(b) 所示, 掺杂组电池的暗态反向饱和电流 I_0 变小. 图 15(c) 是电池开路电压随光强变化曲线, 由 (11) 式可以计算得出电池的理想因子 n ^[29].

$$K = nk_B T/q, \quad (11)$$

其中, k_B 是玻尔兹曼常数, n 是理想因子, T 是热力学温度, q 是基本电荷. 经计算得出, 掺杂组电池的理想因子 n 由 1.81 降低至 1.38, n 值的减小说明 $AlCl_3$ 掺杂使氧化镍与钙钛矿界面之间的陷阱辅助复合减小. 电池的开路电压与暗态反向饱和电流 I_0 及理想因子 n 的关系为

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \cdot \ln \frac{I_{ph}}{I_0}, \quad (12)$$

其中, k 是玻尔兹曼常数, q 为元电荷, T 为绝对温

度, I_{ph} 为光生电流, I_0 为暗态反向饱和电流. 由 (12) 式以及上述测试结果可知, 在理想因子 n 和暗态反向饱和电流 I_0 共同作用下, 电池的开路电压会得到显著提高. 电池的填充因子与开路电压、理想因子之间的关系可由经验公式来表示:

$$FF = \frac{V_{oc} - \frac{nkT}{q} \cdot \ln \left(\frac{qV_{oc}}{nkT + 0.72} \right)}{V_{oc} + nkT/q}. \quad (13)$$

根据 (13) 式可知, 掺杂组电池的开路电压增大且理想因子变小, 填充因子会增大, 这与图 11(c) 的测试结果相一致.

图 16 是电池的 EQE 测试曲线图. 从图 16 可以看出, 在 400—700 nm 波长范围内, 掺杂组电池的 EQE 吸收要高于对照组, 相应地, EQE 积分电流密度分别达到 24.87 mA/cm² 和 25.14 mA/cm², 这与图 11(b) 中变化趋势一致, 电流密度的增大一方面得益于掺杂后空穴层透光率增大, 电池的光吸收增多, 另一方面得益于掺杂组电池的钙钛矿薄膜晶粒尺寸变大, 薄膜质量变好, 电荷复合损失变小. 此外, 我们将未封装的实验组和对照组两种电池置于干燥器中, 考察电池的稳定性. 经过 900 h 自然

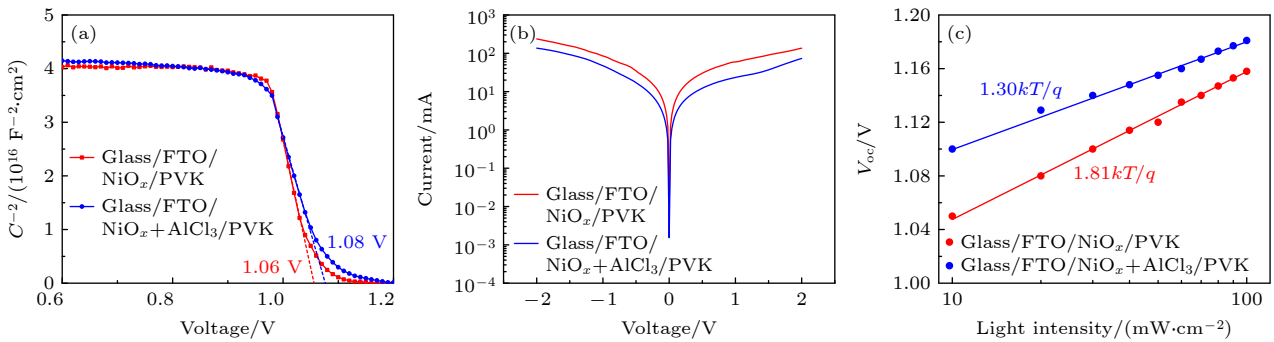


图 15 钙钛矿太阳能电池 (a) 莫特-肖特基曲线; (b) 暗电流曲线; (c) V_{oc} 随光强变化曲线图

Fig. 15. Perovskite solar cell: (a) Mott-Schottky curves; (b) dark current curves; (c) curves of V_{oc} varying with light intensity.

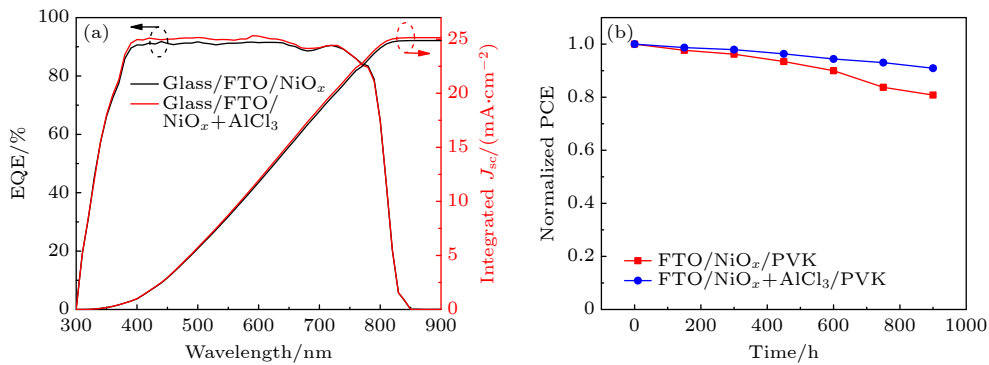


图 16 基底未经掺杂和经 $AlCl_3$ 掺杂的钙钛矿电池 (a) EQE 曲线图; (b) 暗态稳定性测试图

Fig. 16. Perovskite cells on undoped substrate and $AlCl_3$ doped substrate: (a) EQE curves; (b) dark-state stability test curves.

老化后, 两种样品的归一化转换效率 (normalized PCE) 衰减如图 16(b) 所示, 在 AlCl_3 掺杂基底上制备的电池稳定性更好, 900 h 后仍保持初始效率的 90.92%; 相比之下, 在没有 AlCl_3 掺杂基底上制备的电池转换效率降为初始效率的 80.81%. 稳定性测试表明通过 AlCl_3 掺杂提高电池的稳定性.

综上所述, 在 AlCl_3 掺杂的氧化镍上制备的钙钛矿太阳能电池, 氧化镍与钙钛矿层之间的陷阱辅助复合变小, 电池的理想因子和暗态反向饱和电流更小. 因此, 电池的开路电压和填充因子以及短路电流密度都得到提升.

4 结 论

本文采用基于 AlCl_3 掺杂的溶液法制备了氧化镍以及全溶液法反式钙钛矿太阳能电池. 研究表明, AlCl_3 掺杂改善了氧化镍薄膜的致密性, 提高了氧化镍的透光率, 并且提高了氧化镍中 $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$ 比例, 进而提升了氧化镍的电导率. AlCl_3 掺杂有效降低氧化镍与钙钛矿之间的非辐射复合, 促进大尺寸晶粒钙钛矿的生长, 并且降低空穴在氧化镍与钙钛矿界面之间传输的能量壁垒, 提高空穴的提取效率. 基于 AlCl_3 掺杂制备的反式钙钛矿太阳能电池转换效率达 24.76%. 本研究为全溶液法制备高性能反式钙钛矿电池提供可借鉴的策略.

参考文献

- [1] Meng L, You J B, Guo T F, Yang Y 2016 *Acc Chem. Res.* **49** 155
- [2] Xia Y R, Zhu M F, Qin L N, Zhao C, Hong D C, Tian Y X, Yan W S, Jin Z 2023 *Energy Mater.* **3** 300004
- [3] Cheng J, Zhang H, Zhang S P, Ouyang D, Huang Z F, Nazeeruddin M K, Hou J H, Choy W C H 2018 *J. Mater. Chem. A* **6** 23865
- [4] Dewi H A, Wang H, Li J, Thway M, Sridharan R, Stangl R, Lin F, Aberle A G, Mathews N, Bruno A, Mhaisalkar S 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 34178
- [5] Li H, Zhang W 2020 *Chem. Rev.* **120** 9835
- [6] Ma F, Zhao Y, Li J H, Zhang X W, Gu H S, You J B 2021 *J. Energy Chem.* **52** 393
- [7] Zuo C, Ding L M 2015 *Small* **11** 5528
- [8] Li S, Cao Y L, Li W H, Bo Z S 2021 *Rare Metals* **40** 2712
- [9] Yoon S, Kang D W 2018 *Ceram. Int.* **44** 9347
- [10] Huang L X, Wang Y K, Zhu X L, Zhao X Y, Li G X, Li L, Sun W H 2021 *J. Phys. Chem. C* **125** 16066
- [11] Yin X T, Guo Y X, Xie H X, Que W X, Kong L B 2019 *Sol. RRL* **3** 1900001
- [12] Corani A, Li M H, Shen P S, Chen P, Guo T F, Nahhas A E, Zheng K B, Yartsev A, Sundström V, Ponceca Jr C S 2016 *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 1096
- [13] Pathak S K, Abate A, Ruckdeschel P, Roose B, Gödel K C, Vaynzof Y, Santhala A, Watanabe S I, Hollman D J, Noel N, Sepe A, Wiesner U, Friend R, Snaith H J, Steiner U 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 6046
- [14] Teo S, Guo Z L, Xu Z H, Zhang C, Kamata Y, Hayase S, Ma T L 2019 *ChemSusChem* **12** 518
- [15] Chen W, Liu F Z, Feng X Y, Djurišić A B, Chan W K, He Z B 2017 *Adv. Energy Mater.* **7** 1700722
- [16] Park M A, Park I J, Park S, Kim J, Jo W, Son H J, Kim J Y 2018 *Curr. Appl. Phys.* **18** 55
- [17] Qiu Z W, Gong H B, Zheng G H J, Yuan S, Zhang H L, Zhu X M, Zhou H P, Cao B Q 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 7084
- [18] Wu Y W, Chang C Y, Chiu F B, Yang S H 2022 *RSC Adv.* **12** 22984
- [19] Rajbhandari P P, Rijal B, Chen Z Y, Choudhary A, Efstathiadis H, Dhakal T P 2025 *Energy Adv.* **4** 1455
- [20] Song R C, Yang J M, Wu L F, Li H Y, Yang Z X, Wang Z H, Wu Z F, Xue C, Wang S H 2025 *Rare Metals* **44** 973
- [21] Huang K Q, Wang W, Bui A D, Ji W Z, Kremer F, Yang Z S, Bartholazzi G, Yu Y, Lee O, Lem C, He B C, Su Z H, Ahmad V, Chang L C, Nguyen D T, Liu Y, Gao X Y, Yang J L, Catchpole K R, Shen H P, Weber K J, Duong T 2025 *Adv. Science* **12** 14595
- [22] Xiong S B, Yuan M, Yang J M, Song J N, Guo X W, Li X, Li B, Liu X J, Duan C A, Liu F, Fahlman M, Bao Q Y 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900542
- [23] Fang C, Zhao Q Q, Zhao F P, Huang F Z, Peng Y, Ku Z L, Cheng Y B, Fu Z Y 2022 *RSC Adv.* **12** 10863
- [24] Liu T H, Chen K, Hu Q, Zhu R, Gong Q H 2016 *Adv. Energy Mater.* **6** 1600457
- [25] Li R J, Wang P Y, Chen B B, Cui X H, Ding Y, Li Y L, Zhang D K, Zhao Y, Zhang X D 2019 *ACS Energy Lett.* **5** 79
- [26] Shang W L, Wang L K, Zhang X C, Yue X, Li Y F, Wan Z H, Yang H Y, Li T, Wang H 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 028401 (in Chinese) [商文丽, 王立坤, 张晓春, 岳鑫, 李一锋, 万政慧, 杨华翼, 李婷, 王辉 2025 物理学报 **74** 028401]
- [27] Arabpour Roghabadi F, Mansour Rezaei Fumani N, Alidaei M, Ahmadi V, Sadrameli S M 2019 *Sci. Rep.* **9** 9448
- [28] Chen W, Zhou Y C, Wang L J, Wu Y H, Tu B, Yu B B, Liu F Z, Tam H W, Wang G, Djurišić A B, Huang L, He Z B 2018 *Adv. Mater.* **30** 1800515
- [29] Zhang X C, Wang L K, Shang W L, Wan Z H, Yue X, Yang H Y, Li T, Wang H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 248401 (in Chinese) [张晓春, 王立坤, 商文丽, 万政慧, 岳鑫, 杨华翼, 李婷, 王辉 2024 物理学报 **73** 248401]

AlCl₃- doped and fully solution-processed inverted perovskite solar cells

LI Fanhang^{1)2)#} LI Yifeng^{1)2)#} HE Ruyang¹⁾ WANG Likun²⁾
WAN Zhenghui²⁾ ZHU Jiang¹⁾ YU Dongqi^{1)†} WANG Hui^{2)‡}

1) (*School of Physics and Electronic Techonlogy, Liaoning Normal Unvrsity, Dalian 116029, China*)

2) (*Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*)

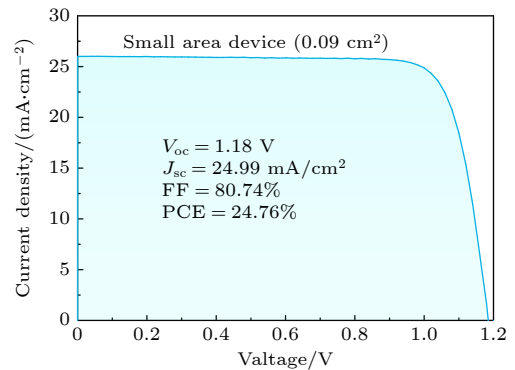
(Received 9 December 2025; revised manuscript received 15 January 2026)

Abstract

The all-solution-processed fabrication of inverted perovskite solar cells is one of the key development trends in perovskite photovoltaics. However, the poor compactness and low electrical conductivity of solution-processed nickel oxide layers have become bottlenecks restricting the large-area fabrication and efficiency improvement of such devices. To address these issues, this paper proposes a method for preparing nickel oxide and inverted perovskite solar cells based on AlCl₃ doping. By incorporating aluminum chloride into the nickel oxide precursor solution, not only can the compactness of the nickel oxide layer be improved, but its electrical conductivity can also be increased. Moreover, this doping strategy promotes the growth of high-quality perovskite films and reduces non-radiative recombination at the nickel oxide/perovskite interface. The fabricated inverted perovskite solar cell prepared via the full-solution method with AlCl₃ doping achieved a power conversion efficiency of 24.76%. This work provides a new strategy for the preparation of large-area, high-efficiency inverted perovskite solar cells through full-solution processing.

Keywords: inverted, perovskite solar cells, NiO_x, AlCl₃

DOI: [10.7498/aps.75.20251692](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251692)



CSTR: [32037.14.aps.75.20251692](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251692)

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: dqyu@lnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hwang1606@dicp.ac.cn

基于 AlCl_3 掺杂全溶液法制备反式钙钛矿太阳电池

李帆杭 李一锋 何汝杨 王立坤 万政慧 朱江 于东麒 王辉

AlCl_3 -doped and fully solution-processed inverted perovskite solar cells

LI Fanhang LI Yifeng HE Ruyang WANG Likun WAN Zhenghui ZHU Jiang YU Dongqi WANG Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 070805 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251692

CSTR: 32037.14.aps.75.20251692

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251692>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双修饰策略制备高性能反式钙钛矿太阳能电池

Fabrication of high-performance inverted perovskite solar cells based on dual modification strategy

物理学报. 2024, 73(24): 248401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241238>

基于ITO修饰的聚酰亚胺基底柔性钙钛矿太阳电池

Flexible perovskite solar cells based on ITO-modified polyimide substrate

物理学报. 2026, 75(6): 248401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251648>

基于埋底界面修饰策略制备正式钙钛矿太阳电池

Fabrication of n-i-p perovskite solar cells based on strategy of buried interface modification

物理学报. 2025, 74(2): 028401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241549>

低温溶液加工 CsPbBr_3 纳晶薄膜制备钙钛矿太阳电池

Perovskite solar cells prepared by processing CsPbBr_3 nanocrystalline films in low temperature solution

物理学报. 2024, 73(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241152>

反式钙钛矿太阳电池中钾离子掺杂NiO提升电荷收集能力研究

Enhancement of charge collection capability by potassium-doped NiO in inverted planar perovskite solar cells

物理学报. 2024, 73(24): 247801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240974>

反应等离子体沉积二氧化锡电子传输层及其在钙钛矿太阳电池中的应用

Electron transport layer of tin dioxide deposited by reactive plasma and its application in perovskite solar cells

物理学报. 2023, 72(17): 178401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230693>